

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Miklaužić

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Joško Petrić

Student:

Ivan Miklaužić

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Ujedno se zahvaljujem voditelju rada prof. dr. sc. Jošku Petriću na pomoći i savjetima pri izradi rada.

Posebno se zahvaljujem roditeljima koji su mi omogućili studiranje i bili mi najveća podrška tokom cijelog studiranja.

Također se zahvaljujem djevojci Moniki na podršci tokom cijelog studiranja.

Ivan Miklaužić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Miklaužić** Mat. br.: 0035181792

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **IZBOR HIDRAULIČKOG FLUIDA I NJEGOVO ODRŽAVANJE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **SELECTION AND SERVICING OF HYDRAULIC FLUID**

Opis zadatka:

Hidraulički fluid ključni je element svakog hidrauličkog sustava, a često je njegova uloga zanemarena i nedovoljno poznata. Zbog sve većih zahtjeva koji se stavljaju pred suvremeni hidraulički sustav glede radnih svojstava, a posebno stupnja korisnog djelovanja i ispunjavanja ekoloških zahtjeva, tim više uloga izbora fluida postaje naglašena. U zadatku je potrebno napraviti sljedeće:

- Definirati osnovna svojstva fluida
- Svrstati osnovne vrste fluida
- Dati smjernice za odabir fluida
- Razmotriti uvjete i trošak prijelaza s mineralnog ulja na eko-fluide
- Razmotriti pitanja održavanja fluida (period zamjene, filtriranje, itd.),

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Joško Petrić

Rok predaje rada:

- 1. rok: 25. veljače 2016.
- 2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
- 3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
- 2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
- 3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
1. Uvod.....	1
2. Svojstva fluida	2
2.1. Osnovna svojstva fluida.....	2
2.1.1. Gustoća fluida.....	2
2.1.2. Stlačivost fluida	3
2.1.3. Viskoznost fluida.....	4
2.2. Toplinska svojstva fluida.....	5
2.2.1. Specifični toplinski kapacitet.....	5
2.2.2. Toplinsko širenje	6
2.2.3. Toplinska vodljivost	6
2.3. Ostala svojstva fluida.....	6
2.3.1. Zapaljivost	7
2.3.2. Podmazivost.....	7
2.3.3. Korozivnost	7
2.3.4. Pjenjenje	7
2.3.5. Kompatibilnost	8
2.3.6. Toksičnost.....	8
2.3.7. Tlak isparavanja.....	8
3. Vrste hidrauličkog fluida i njihove karakteristike	9
3.1. Mineralna ulja.....	10
3.2. Biorazgradivi fluidi.....	13

3.2.1.	Organizacije za zaštitu okoliša	13
3.2.2.	Vrste biorazgradivih fluida	15
3.2.3.	Biorazgradnja i ispitivanje biorazgradivosti fluida	17
3.2.3.1.	Ispitivanje biorazgradnje pomoću ASTM metoda	17
3.2.3.2.	Ispitivanje biorazgradnje pomoću OECD metoda	20
3.3.	Teško zapaljivi fluidi	23
3.3.1.	Vrste teško zapaljivih fluida	23
3.3.2.	Opasnost i izvori zapaljenja hidrauličkih fluida	25
3.3.3.	Ispitivanje zapaljivosti fluida.....	26
3.3.3.1.	Karakteristike zapaljivost fluida.....	26
3.3.3.2.	Postupci određivanja količine topline.	29
3.3.3.3.	Metode ispitivanja zapaljivosti fluida	30
4.	Izbor hidrauličkog fluida.....	33
4.1.	Faktori koje uzimamo u obzir pri odabiru fluida.....	34
4.2.	Osnovni problemi postavljeni prilikom odabira fluida.....	35
5.	Održavanje hidrauličkog fluida.....	37
5.1.	Vrste onečišćenja fluida.....	37
5.1.1.	Onečišćenje krutim česticama	37
5.1.2.	Onečišćenje vodom.....	38
5.1.3.	Onečišćenje zrakom.....	40
5.2.	Standard čistoće fluida.....	40
5.3.	Filtriranje hidrauličkog fluida.....	42
5.3.1.	Vrste materijala i efikasnost filtera.....	42
5.3.2.	Vrste filtera i njihova primjena.....	44
5.3.3.	Ispitivanje kvalitete fluida	45
6.	Zaključak.....	47
7.	Literatura.....	48

POPIS SLIKA

Slika 1.	Viskoznost fluida [6].....	4
Slika 2.	Logo Njemačke i Američke organizacije za zaštitu okoliša [18], [19].....	14
Slika 3.	Prikaz uređaja za ASTM D 5864 metodu ispitivanja biorazgradivosti [23].....	18
Slika 4.	Prikaz uređaja za ASTM D 6731 metodu ispitivanja biorazgradivosti (respirometar) [23]	19
Slika 5.	Uređaj za mjerenje indeksa kisika [28].....	27
Slika 6.	„Cone calorimeter” [30].....	30
Slika 7.	Prikaz onečišćenja okoliša [33].....	36
Slika 8.	Vizualni efekt vode u ulju [34]	38
Slika 9.	Uređaj za vakuum dehidraciju [35].....	39
Slika 10.	Prijenosni brojač čestica [39]	46

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Klasifikacija maziva i industrijskog ulja prema ISO 6743 [9].....	10
Tablica 2.	Oznake mineralnih ulja prema ISO 11158 [14]	11
Tablica 3.	Najveće organizacije za zaštitu okoliša.....	13
Tablica 4.	Oznake ekološki prihvatljivih fluida prema ISO 15380 [14].....	15
Tablica 5.	Usporedba mineralnih ulja i ekološki prihvatljivih fluida [21].....	16
Tablica 6.	Objašnjenje oznake CEC ispitivanja	21
Tablica 7.	Kriteriji za ispitivanja biorazgradivosti [21]	22
Tablica 8.	Oznake ekološki prihvatljivih fluida prema ISO 12922 [14].....	23
Tablica 9.	Prikaz određenih temperatura pojedinih fluida [29].....	28
Tablica 10.	Prikaz ISO klasifikacija 22 / 20 / 12 [34].....	41
Tablica 11.	Klasifikacija čistoće ulja prema ISO 4406:1999 [34]	41
Tablica 12.	Usporedba karakteristika materijala filtera [34].....	43
Tablica 13.	Prikaz vrijednosti stupnja finoće filtriranja i odgovarajuće efikasnosti [34]	43

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	površina
α	$1/^\circ\text{C}$	koeficijent volumenskog širenja fluida
β	$1/\text{Pa}$	koeficijent volumenske stlačivosti
β_x	-	stupanj gustoće filtriranja hidrauličnog fluida
c	$\text{J}/(\text{kg K})$	specifični toplinski kapacitet
F	N	sila
K	N/m^2	volumenski modul elastičnosti
m	kg	masa
p	Pa	tlak
T	K	temperatura
τ	N/m^2	smično naprezanje
V	m^3	volumen
ν	cSt	kinematička viskoznost
v	m^3/kg	specifični volumen
μ	Pa s	dinamička (apsolutna) viskoznost fluida
ρ	kg/m^3	gustoća

SAŽETAK

Hidraulički fluid ključni je element svakog hidrauličkog sustava, a često je njegova uloga zanemarena i nedovoljno poznata. Upravo zbog tih razloga, u ovom radu detaljno su opisane vrste hidrauličkog fluida kao i pravilan izbor. Zbog sve većih zahtjeva koji se stavljaju pred suvremeni hidraulički sustav glede radnih svojstava, a posebno stupnja korisnog djelovanja i ispunjavanja ekoloških zahtjeva, tim više uloga izbora fluida postaje naglašenija. Također, redovitim održavanjem postiže se dulji vijek trajanja komponenti hidrauličkog sustava kao i samog fluida.

1. UVOD

Hidraulika je znanost koja se bavi tehničkom primjenom hidromehanike, odnosno prijenosom energije i informacija putem stlačene tekućine. Zastupljena je kako u industriji tako i u transportu, te se može reći da je pokazatelj ukupnog stanja gospodarstva neke zemlje.

Stlačena tekućina ili hidraulički fluid je osnovni element bilo kojeg hidrauličkog sustava. Kako bi se pobliže upoznali sa hidrauličkim fluidom, točnije izborom hidrauličkog fluida, u drugom poglavlju razjašnjena su svojstva fluida, počevši od osnovnih svojstava pa sve do specifičnih, dok su osnovne vrste hidrauličkog fluida razjašnjene detaljno u trećem poglavlju.

Osnovna tema ovog rada razrađena je u četvrtom poglavlju, gdje je dan osvrt na važnost pravilnog izbora hidrauličkog fluida. Izbor fluida je vrlo važna stavka prilikom projektiranja nekog hidrauličkog sustava. Jednako koliko je važan izbor fluida, važno je i stručno te redovito održavanje koje je objašnjeno u petom poglavlju.

Na temelju gore iznesenih poglavlja, na kraju je izveden zaključak o važnosti i mogućnostima izbora hidrauličkog fluida, a posebice njegovog održavanja koje danas poprima veliku pažnju u svijetu hidraulike i hidrauličkog medija.

2. SVOJSTVA FLUIDA

Fluidi predstavljaju jedan od najvažnijih elemenata hidrauličkog sustava. Osim što prenose energiju, te tako vrše osnovnu ulogu, oni služe za podmazivanje, odvođenje topline, zaštitu od korozije te se mogu koristiti i kao sredstvo brtvljenja. Dakle, zahtjevi koje hidraulički fluidi moraju podnositi su mnogobrojni, te su vrlo često zajednički neizvedivi. Svojstva fluida također ovise o tlaku i temperaturi, što je posebice važno kod hidrauličkog fluida jer se svojstva fluida mogu značajnije mijenjati tijekom rada, odnosno doprinositi različitim svojstvima samog fluida [1].

2.1. Osnovna svojstva fluida

Vrlo važna svojstva za raspolaganje općim znanjem o fluidnoj tehnici, te upotrebljavana pri većini zadataka vezanih uz proračun ponašanja fluida, su sljedeća tri svojstva :

- Gustoća
- Stlačivost
- Viskoznost

2.1.1. *Gustoća fluida*

Gustoća fluida jednaka je masi m dotičnog fluida po jedinici volumena V kojeg zauzima :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Porastom tlaka povećava se gustoća materijala, odnosno porastom temperature gustoća se smanjuje. Iznimke su rijetke, no pojava vezana uz vodu, tzv. anomalija vode dobar je primjer gdje se porastom temperature ($0^\circ - 4^\circ\text{C}$) povećava i njezina gustoća.

Recipročna vrijednost gustoće zove se specifični volumen v , te se najviše koristi uz primjenu termodinamike.

2.1.2. Stlačivost fluida

Stlačivost ili kompresibilnost fluida je sposobnost fluida da mijenja svoj volumen zbog promjene tlaka. Stlačivost se kvantitativno izražava u diferencijalnom obliku [2] :

$$\frac{dV}{V} = -\frac{dp}{K} \quad (2.2)$$

Gdje je V volumen, p tlak, a K volumenski modul elastičnosti. Negativni predznak pokazuje da smanjenjem volumena dolazi do povećanja tlaka, a izraz dV/V označava relativnu promjenu volumena. Volumenski modul elastičnosti („*bulk modulus*”) je recipročna vrijednost koeficijenta volumenske stlačivosti β [3] :

$$\beta = \frac{1}{K} \quad (2.3)$$

Koeficijent volumenske stlačivosti β je mjera promjene volumena kako se mijenja tlak fluida, te se može definirati pri izotermnoj ili adijabatskoj promjeni stanja. Povezivanjem jednadžbe (2.2) i jednadžbe (2.3) slijedi da je :

$$dV = -\beta \cdot V \cdot dp \quad (2.4)$$

Odnosno, smanjenje volumena fluida uslijed porasta tlaka može se napisati pomoću jednadžbe (2.3) i jednadžbe (2.4), te slijedi :

$$dV = -\frac{V}{K} dp \quad (2.5)$$

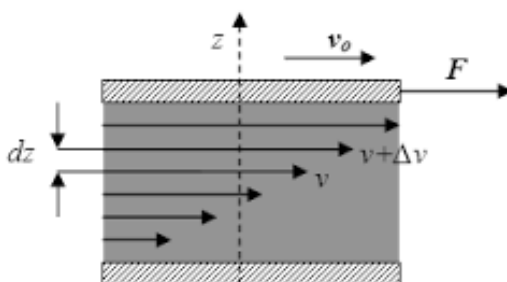
Modul elastičnosti može se odrediti različito, te može imati i različite vrijednosti. O načinu određivanja vrijednosti modula elastičnosti u hidraulici napisan je veći broj radova [4]. Vrijednost modula elastičnosti raste porastom tlaka, a porastom temperature vrijednost modula kod većine hidrauličkih fluida pada. Najznačajniji pad modula elastičnosti je kod mineralnih ulja.

2.1.3. Viskoznost fluida

Viskoznost je mjera otpora tečenja fluida koji se podvrgava smičnom naprezanju, odnosno to je svojstvo otpornosti tekućine prema smičnoj ili kutnoj deformaciji [5]. Kako se fluidi konstantno gibaju, tako se kao reakcija na stalna smična naprezanja i kontinuirano deformiraju, te oslobađaju toplinu. Smično naprezanje fluida τ proporcionalno je brzini kutne deformacije $d\dot{x}/dy$, te je to vidljivo na Slici 1. Veza između te dvije veličine naziva se dinamička viskoznost ili apsolutna viskoznost fluida μ , pa formula glasi :

$$\tau = \mu \cdot \frac{d\dot{x}}{dy} \quad (2.6)$$

Fluidi koji poštuju tu zakonitost (2.6) nazivaju se Newtonovskim fluidima.¹ Većina fluida koji se koriste u hidraulici upravo pripadaju toj vrsti. Viskoznost fluida prikazana je na Slici 1 gdje se vidi da brzina fluida ovisi o udaljenosti pokretne i nepokretne ploče.



Slika 1. Viskoznost fluida [6]

Za pokretanje ploče potrebna je nekakva sila, koja se može zapisati ovako :

$$F = \tau \cdot A \quad (2.7)$$

Uvrštavanjem (2.7) u (2.6) dobiva se sljedeći izraz za silu viskoznog trenja (2.8).

$$F = \frac{\mu \cdot A}{y} \cdot \dot{x} \quad (2.8)$$

¹ Newtonovski fluidi su fluidi koji poštuju linearni odnos naprezanja i brzine kutne deformacije.

Iz formule (2.8) vidljivo je da je koeficijent viskoznog trenja proporcionalan dinamičkoj viskoznosti μ , površini dodira A , a obrnuto proporcionalan debljini fluida y , odnosno na slici prikazanog kao z .

U hidraulici se vrlo često koristi pojam kinematičke viskoznosti ν koji predstavlja omjer dinamičke viskoznosti μ i gustoće ρ :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.9)$$

Temperatura i tlak također imaju veliki utjecaj na viskoznost fluida. Tako primjerice porastom temperature viskoznost većine tekućina pada no ne i vodi, dok kod porasta tlaka viskoznost tekućina raste.

Viskoznost je jedno od najvažnijih svojstava pri odabiru hidrauličkog fluida. Previsoka viskoznost kao posljedicu ima veliki pad tlaka, te povećanje temperature, dok preniska viskoznost dovodi do slabog podmazivanja, te povećanog trošenja.

2.2. Toplinska svojstva fluida

Toplinska svojstva fluida vrlo su važna u primjeni hidraulike, a najvažniji razlog tome je prijenos topline, odnosno hlađenje dijelova pomoću fluida.

2.2.1. Specifični toplinski kapacitet

Specifični toplinski kapacitet c definiran je kao količina topline Q_H koju treba dovesti tijelu mase m 1 kg kako bi mu se temperatura povisila za 1 °C ili za 1 K, a definiran je izrazom [7] :

$$c = \frac{dQ_H}{mdT} \quad (2.10)$$

Voda, kao hidraulički fluid, bolja je od ulja jer zahtjeva više nego dvostruko veću količinu topline da se postigne jednaka temperatura jednake mase fluida, no ako se hladi, potrebno je odvesti više nego dvostruko veću količinu topline vodi da bi temperatura bila ista kao i kod ulja.

2.2.2. Toplinsko širenje

Toplinsko širenje je svojstvo materijala, u ovom slučaju fluida, da mijenja volumen u ovisnosti s promjenom temperature. Koeficijent volumenskog širenja fluida α pri konstantnoj temperaturi definiran je izrazom :

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (2.11)$$

U hidraulici na toplinsko širenje fluida značajnije utječe toplinsko širenje spremnika, odnosno dijelova u kojima je fluid smješten, npr. cijevi, spremnici... Efektivni koeficijent volumenskog širenja α_e suma je koeficijenata volumenskog širenja tekućine α_l i spremnika α_c :

$$\alpha_e = \alpha_l + \alpha_c \quad (2.12)$$

2.2.3. Toplinska vodljivost

Toplinska vodljivost može se izraziti koeficijentom vodljivosti topline λ , koji je numerički jednak količini topline koja prođe kroz jediničnu izotermnu plohu u jedinici vremena, uz jedinični temperaturni gradijent [8]. Taj se koeficijent mijenja u širokom rasponu, od materijala koji dobro vode toplinu do onih koji je vode veoma loše.

2.3. Ostala svojstva fluida

Svojstva koja imaju veliku ulogu pri odabiru hidrauličkog fluida, a najviše ovise o radnoj okolini, te o hidrauličkom sustavu u kojem se fluid koristi.

2.3.1. Zapaljivost

Upotrebom hidrauličkog fluida sve više dolaze do izražaja fluidi koji su teško zapaljivi, te ne podržavaju gorenje. Hidraulika je vrlo često smještena u okruženju koje poprima visoke temperature, te zbog toga fluid ne smije podržavat gorenje. Radi primjera, mineralna ulja imaju temperaturu zapaljenja relativno nisku (oko 350 °C), dok radno okruženje može poprimiti temperaturu nekoliko stotina °C više.

2.3.2. Podmazivost

Podmazivost je mogućnost fluida da nosi veliki teret zadržavajući svojstvo niskog trenja, a jedan od najvažnijih faktora je zasigurno viskoznost. Kako bi se poboljšala svojstva podmazivanja fluidima se dodaju određeni aditivi. Povećanje tlaka i brzine sustava, te smanjenje tolerancija zazora negativno utječe na svojstvo podmazivosti.

2.3.3. Korozivnost

Korozivnost je važno svojstvo fluida jer fluid ne smije poticati koroziju, odnosno mora spriječiti formiranje korozije na hidrauličkim elementima. To se postiže dodavanjem aditiva. Radi primjera, voda ima dosta dobra svojstva kao hidraulički fluid no svojstva korozivnosti, te svojstva podmazivanja su vrlo loša.

2.3.4. Pjenjenje

Pjenjenje tekućine je ustvari stvaranje emulzije s plinovima, te nije poželjno jer uzrokuje kavitaciju, povećanje buke, te intenzivno trošenje elemenata. Najčešće do pjenjenja dolazi prilikom smanjene razine ulja u spremniku, te prebrzim protokom kroz povratnu liniju.

2.3.5. Kompatibilnost

Fluid obavezno mora biti kompatibilan sa hidrauličkim sustavom, odnosno s elementima tog sustava kao što su ventili, razvodnici, brtve, završne obrade elemenata. Radi primjera, fluid koji se upotrebljava u sustavu gdje je ugrađen servo – ventil mora biti puno bolje profiltriran jer u suprotnom bi vrlo brzo došlo do zastoja sustava.

2.3.6. Toksičnost

Fluidi ne smiju biti otrovni za živa bića, te ne smiju zagađivati okoliš. U današnje vrijeme vrlo često se govori o ekološkim fluidima („green fluids”) kako bi zagađenje okoliša bilo što manje, no odabir tih fluida nije uvijek jednostavan. To svojstvo je najvažnije u farmaceutskoj i prehrambenoj industriji.

2.3.7. Tlak isparavanja

Vrlo važno svojstvo jer prilikom isparavanja fluida, te njegovog ponovnog vraćanja u kapljevito stanje, dolazi do pojave kavitacije². Poželjno je da pri određenoj temperaturi fluid počinje isparavati pri što nižem tlaku.

² Kavitacija je pojava koja se dešava prilikom isparavanja fluida, te tako nastaju mjehurići pare. Mjehurići pare bivaju nošeni u područje višeg tlaka, gdje implodiraju (ponovno se vraćaju u kapljevitu fazu). Implozijom mjehurića pare u blizini stijenke dolazi do njena oštećenja [5].

3. VRSTE HIDRAULIČKOG FLUIDA I NJIHOVE KARAKTERISTIKE

Standardne karakteristike hidrauličkih fluida i komponenti imaju vrlo veliku ulogu u hidraulici, te će nam potvrditi sigurnost, trajnost, kompatibilnost i funkcionalnost hidrauličkog fluida. Uvođenjem standardnih simbola i terminologije stvoren je zajednički jezik između proizvođača i korisnika. Ti standardi vrlo su važni u hidrauličkom svijetu jer se hidrauličke komponente, odnosno fluidi proizvode diljem svijeta.

Međunarodna organizacija za standardizaciju (ISO) upravlja svjetskim standardima za sigurnost, pouzdanost, efikasnost i zamjenjivošću na širokom području koje uključuje zrakoplovstvo, komunikacije, medicinske uređaje, građevinski materijal, te fluide. ISO predstavlja mrežu nacionalnih instituta za standardizaciju 162 zemlje, po principu jedan član iz svake države, sa sjedištem u Ženevi u Švicarskoj. Američko društvo za ispitivanje i materijale (ASTM) predstavlja Američki nacionalni institut za standarde (ANSI) s naglaskom na standarde goriva i maziva. Te organizacije drže poziciju tajništva unutar ISO organizacije, te su odgovorne za organizaciju sastanaka, podjelu glasačkih listića i dr.

ISO standardi su osnovani kroz suradnju stručnjaka u okviru tehničkog povjerenstva (TC). Za standarde hidrauličkog fluida odgovorno je tehničko povjerenstvo 28 (TC – 28), dok je za razvoj standarda hidrauličke opreme odgovorno tehničko povjerenstvo 131 (TC - 131). ISO standardi igraju veliku ulogu u sigurnosti, efikasnosti i pouzdanosti hidrauličkih sustava.

Uloga hidrauličkog fluida je prijenos snage, no nije mu to i jedina uloga. Hidraulički fluid također mora obnašati funkciju podmazivanja, odvodnje topline, te štititi sustav od korozije. Mnogi fluidi sastoje se od osnove, baze fluida u koju su dodani dodaci kako bi se poboljšala svojstva i njihova funkcionalnost. Vrsta opreme i radna okolina uvelike diktiraju vrstu hidrauličkog fluida.

ISO 6743 definira općenitu klasifikaciju maziva, industrijskih ulja i srodnih proizvoda označenih slovom L („*Lubricants*”). U Tablici 1 svrstane su vrste ulja prema području uporabe, a postoji i detaljnija podjela unutar svake skupine.

Tablica 1. Klasifikacija maziva i industrijskog ulja prema ISO 6743 [9]

SPECIFIKACIJE	GRUPA	VRSTA
ISO 6743 - 1	A	Ulja za sustave bez povrata
ISO 6743 - 2	F	Ulja za ležajeve i pridružene spojke
ISO 6743 - 3	D	Kompresorska ulja
ISO 6743 - 4	H	Hidraulična ulja
ISO 6743 - 5	T	Turbinska ulja
ISO 6743 - 6	C	Zupčanička ulja
ISO 6743 - 7	M	Ulja i tekućine za obradu kovina
ISO 6743 - 8	R	Sredstva za privremenu zaštitu od korozije
ISO 6743 - 9	X	Mazive masti
ISO 6743 - 10	Y	Ostale primjene
ISO 6743 - 11	P	Ulja za pneumatske uređaje
ISO 6743 - 12	Q	Ulje i tekućine za prijenos topline
ISO 6743 - 13	G	Ulja za klizne staze
ISO 6743 - 14	U	Ulja za termičku obradu kovina
ISO 6743 - 15	E	Ulja za motore s unutarnjim izgaranjem

Kao što je vidljivo iz Tablice 1, ISO 6743 – 4 opisuje kategoriju hidrauličkih fluida, a kategorije unutar ove klasifikacije su [10] :

- Mineralna ulja
- Ekološki prihvatljivi fluidi
- Teško zapaljivi fluidi

Karakteristike tih vrsta fluida su također opisane kroz ISO standarde :

- ISO 11158 – Karakteristike za mineralna ulja [11]
- ISO 15380 – Karakteristike za biorazgradive fluide [12]
- ISO 12922 – Karakteristike za teško zapaljive fluide [13]

3.1. Mineralna ulja

Mineralna ulja su ujedno i najzastupljeniji fluidi u hidraulici, kako zbog dobrih svojstava, tako i zbog dostupnosti i relativno niske cijene. Ipak, zbog sve većih mjera opreza, odnosno onečišćenja okoliša, upotreba mineralnih ulja počinje se smanjivati [14].

Područje mineralnog ulja ima širok raspon, a standard ISO 11158 opisuje osnovna fizikalna svojstva i karakteristike pet vrsta mineralnih ulja što je vidljivo iz Tablici 2.

Tablica 2. Oznake mineralnih ulja prema ISO 11158 [14]

SIMBOL	KLASIFIKACIJA	KOMERCIJALNE OZNAKE
HH	Neinhibirana rafinirana mineralna ulja	Bazna ulja
HL	Rafinirana mineralna ulja sa poboljšanjem protiv korozije i oksidacijski stabilna ulja	R&O ulja („Rust & Oxidation”)
HM	HL ulja sa dodacima protiv trošenja	Ulja protiv trošenja
HG	HM ulja sa dodacima za poboljšanje karakteristika trenja („slip/stick”)	Ulja za podmazivanje hidrauličkih vodilica
HV	HM ulja sa poboljšanim indeksom viskoznosti	Višerazredna ulja

HH mineralna ulja

HH ulja su mineralna ulja bez dodataka. Najčešće se koriste kod ručnih hidrauličkih pumpi, dizalica i ostalih sustava s relativno niskim tlakom. Iako su u stanju izvesti glavnu zadaću hidrauličkog sustava, prijenos snage, nisu u stanju raditi na visokim temperaturama i imaju ograničena svojstva podmazivanja. Zbog kratkog vijeka trajanja primjena u industriji im je ograničena. U zemljama zapadne Europe ova vrsta ulja koristi se sve rjeđe [15].

HL mineralna ulja

HL ulja su mineralna ulja sa dodacima. Sadrže inhibitore korozije i oksidacije za zaštitu opreme od štetnih utjecaja onečišćenja vode i kemijskog propadanja zbog vrućine, te se često nazivaju R&O ulja („Rust & Oxidation”). Koriste se najčešće u hidrauličkim sustavima koji nemaju specifičnih zahtjeva i za sustave koji rade na relativno niskom tlaku. Također, koriste se u primjeni kod nekih klipnih pumpi zato jer neka ulja protiv trošenja mogu biti agresivna prema pojedinim dijelovima tih pumpi.

HM mineralna ulja

HM ulja također sadrže inhibitore korozije i oksidacije kao i HL, ali sadrže i dodatke protiv trošenja. Najčešće korišteni dodatak protiv trošenja je cinkov dialkilditiofosfat (ZDTP). Zbog tih svojstava protiv trošenja, koji pružaju bolje karakteristike pri primjeni visokih tlakova, HL ulja su i najčešće korišteni mineralna ulja. Starije verzije HM ulja imale su nedostatak toplinske stabilnosti što je bilo potrebno za zadovoljavajuće performanse klipnih pumpi dok su moderna ulja u mogućnosti dobro obavljati te funkcije. Koriste se u situacijama kada je potreban dugi vijek trajanja, te dobra zaštita od korozije i trošenja.

HG mineralna ulja

HG ulja sadrže slične dodatke protiv trošenja kao i HM ulja, ali ta ulja imaju još dodatke za poboljšanje „slip/stick³” karakteristika. Također sadrže dodatke protiv trenja koji ujedno i smanjuju statičko trenje. Ova ulja koriste se kod alatnih strojeva koji koriste zajednički spremnik za hidraulički sustav i za podmazivanje vodilica, te se tako omogućuje nesmetani rad stroja. Također se koriste pri upotrebi hidrauličkih dizalica i kranova.

HV mineralna ulja

HV ulja sadrže istu kemijsku osnovu kao i HM ulja, te također sadrže i dodatke koji poboljšavaju indeks viskoznosti. Visoki indeks viskoznosti postiže se dodavanjem dodataka i/ili pomoću osnovnog ulja s prirodno visokim indeksom viskoznosti što je i češće. Također, visoki indeks viskoznosti ima minimalni efekt na viskoznost fluida pri niskim temperaturama, dok pri visokim temperaturama daje zgusnuti efekt. Zbog toga HV ulja imaju dobra viskozno – temperaturna svojstva, te im to omogućava rad na širokom rasponu temperatura.

³ Slip/stick je pojava izmjeničnog relativnog klizanja i relativnog mirovanja ili spontanoga izmjeničnog povećanja i smanjenja relativne brzine pri dinamičkom trenju [16].

3.2. Biorazgradivi fluidi

Iako su mineralna ulja najčešće upotrebljavani fluidi u hidrauličkom svijetu, sve češće su podvrgnuti većim kontrolama, posebice zbog sve strožih zakona koji se odnose na izlivanje i curenje hidrauličkog fluida u okoliš. Agencija za zaštitu okoliša (EPA) i dalje zagovara korištenje ekološki prihvatljivih fluida na mjestima gdje se upotrebljava mineralno ulje, a posebice u primjeni gdje istjecanje može imati štetne posljedice za okoliš.

Istjecanjem mineralnog ulja dolazi do kontaminacije okoliša, što utječe na biljni i životinjski svijet. Europske studije su dokazale kako je izlivanje, odnosno curenje hidrauličkog fluida jedan od glavnih uzroka onečišćenja podzemnih voda, te širom svijeta počinje razvijanje fluida koji neće biti štetni za okoliš, tzv. biorazgradivi fluidi [17].

Da bi se klasificirala kao ekološki sigurna, ulja moraju biti lako razgradiva i gotovo netoksična, tj. više od 60 % ulja mora se pretvoriti u neškodljiv proizvod pri ispitivanju u laboratorijskim uvjetima u trajanju od 28 dana. Glavna prednost tih biorazgradivih fluida je ta da će u slučaju katastrofe troškovi čišćenja biti niži, te da će manje naštetiti biljnom i životinjskom svijetu.

Ekološki prihvatljivi fluidi koriste se u industrijama gdje postoji mogućnost kontaminacije okoliša, kao npr. u šumarstvu, poljoprivredi, rudarstvu, hidro elektranama, građevinskim strojevima, brodovima za ribolov, „off - shore” eksploatacijama, te na hidraulički upravljanim branama i mostovima.

3.2.1. Organizacije za zaštitu okoliša

Postoji velik broj organizacija za zaštitu okoliša u svijetu, a najpoznatije organizacije su prikazane u Tablici 3.

Tablica 3. Najveće organizacije za zaštitu okoliša

DRŽAVA	ORGANIZACIJA
Njemačka	Blue Angel
Kanada	Environmental Choice
Japan	Eco – Mark
Francuska	N - F Environment
USA	Green Seal

Na slici 2 je prikazan logo Njemačkog „Blue Angel” i Američkog „Green Seal” koje su ujedno i najveće organizacije tog tipa.



Slika 2. Logo Njemačke i Američke organizacije za zaštitu okoliša [18], [19]

Jedna od prvih i najstrožih organizacija je upravo Njemački „Blue Angel” koji zahtijeva da biorazgradivi hidraulički fluid, odnosno osnova tog fluida bude više od 80 % biorazgradiva u 21 dan ispitivanja prema CEC-L-33-A-93 testu ili 70 % biorazgradiva prema modificiranom Sturm testu („Modified Sturm Test”) u istom vremenskom periodu. Osim toga, sve komponente moraju biti „Water Hazard Class” od 0 – 1, što ujedno znači da komponente ne zagađuju vodu. Pojašnjenje oznake CEC ispitivanja objašnjeno je u daljnjem tekstu.

„Environmental Choice” ili ekološki izbor program je Kanade koji je tek u razvoju, te će vjerojatno uključivati zahtjev da osnova fluida bude više od 90 % biorazgradiva u 21 dan prema CEC-L-33-A-93 testu.

U Sjedinjenim Američkim Državama, trenutno se razrađuje od strane ASTM D.02 N.03 pododbora standard za klasifikaciju ekološki prihvatljivih hidrauličkih tekućina. Međutim, umjesto naziva „ekološki prihvatljivi”, te tekućine biti će klasificirane kao „ekološki ispitane” (EE). Isto tako, ASTM D.02 N.03 pododbor radi na utvrđivanju standarda za klasifikaciju i testiranje ekološki ispitanih tekućina.

3.2.2. Vrste biorazgradivih fluida

Hidraulički fluidi na biljnoj bazi se proizvode iz obnovljivih izvora kao što je uljana repica, cvijet suncokreta, kukuruz, soja, te sintetički esteri⁴. Ti fluidi se smatraju manje toksičnim i bolje biorazgradivim od standardnih hidrauličkih fluida.

Ekološki prihvatljiva hidraulička ulja sastoje se od triju različitih baza:

- Ulja na biljnoj bazi
- Ulja na bazi sintetičkih esteri
- Ulja na bazi poliglikola

Korištenjem metodologija određenih organizacija, kao što su OECD, CEC i EPA, koje će biti spomenute u daljnjem tekstu, standardna podjela i karakteristike koje odgovaraju ekološkom fluidu utvrđene su također od strane ISO organizacije. U Tablici 4 može se vidjeti ISO 15380 klasifikacija za ekološki prihvatljive fluide.

Tablica 4. Oznake ekološki prihvatljivih fluida prema ISO 15380 [14]

SIMBOL	KLASIFIKACIJA	KOMERCIJALNE OZNAKE
HETG	Biljna ulja	Biljna ulja, triglicerid i prirodni ester
HEES	Ulja na bazi sintetičkog estera	Sintetički ester
HEPG	Ulja na bazi poliglikola	Poliglikol
HEPR	Ulja na bazi polialfaolefina	Polialfaolefin ili sintetizirani ugljikovodik

Biljna ulja proizvode se iz obnovljivih izvora, npr. uljane repice, cvjetova suncokreta, kukuruza, soje. Imaju odličnu prirodnu biorazgradivost, cjenovno su jeftinija od mineralnih ulja i nisu toksična. Oksidiraju na temperaturi od 90°C i imaju kratak vijek trajanja u usporedbi s mineralnim

⁴ Esteri su organske tvari u kojima organska grupa zamjenjuje jedan ili više atoma vodika u hidroksilnoj skupini. Najpoznatiji esteri su karboksilni esteri, no postoje i esteri alkohola i anorganskih kiselina, a jedan od najpoznatijih je nitroglicerol [20].

uljima. Također, upotrebljivi su samo do -15°C . S druge strane, biljna ulja nude odličnu sposobnost podmazivanja, visok indeks viskoznosti, dobra svojstva protiv trošenja, te dobra svojstva na visokim tlakovima.

Sintetički esteri mogu se opisati kao biorazgradivi fluidi s vrhunskim performansama podmazivanja, ali njihova visoka cijena ograničava njihovo korištenje. Biorazgradiva svojstva tih ulja su slična kao i kod biljnih ulja, dok je svojstvo podmazivanja vrlo slično mineralnim uljima. Zbog odlične fluidnosti i stabilnosti, funkcionalni su pri širokom rasponu temperatura od -54°C do 150°C . Vijek trajanja ulja na bazi sintetičkog estera dulji je od vijeka trajanja mineralnih ulja.

Poliglikol ulja su vrlo zanimljiva jer imaju odlična svojstva podmazivanja, jeftinija su od sintetičkih estera pa je to i ujedno razlog zašto se češće koriste. Nedostatak im je to što su potencijalno toksični pri miješanju s vodom, imaju loše ponašanje prema standardnim dodacima, te nisu kompatibilni s mineralnim uljima.

Kao i kod mineralnih ulja, biljna ulja i sintetički esteri također moraju imati određene dodatke kao što su antioksidansi, inhibitori korozije, te stabilizatori tecišta kako bi se poboljšala svojstva podmazivanja. Biljna ulja sadrže nezasićene ugljikovodike koji dovode do brze oksidacije pri povišenim temperaturama i imaju loša svojstva tečenja pri niskim temperaturama. Svojstva tečenja se mogu poboljšati određenim dodacima, ali oksidacijske stabilnosti je upitna. Također, dodavanjem klasičnih dodataka u te fluide može biti problem za biorazgradivost i eko – toksikološka svojstva pa proizvođači stavljaju veliku pažnju na razvoj dodataka koji su kompatibilni s biorazgradivim fluidima [21].

Općenite razlike između mineralnih ulja i ekološki prihvatljivih fluida prikazane su u Tablici 5.

Tablica 5. Usporedba mineralnih ulja i ekološki prihvatljivih fluida [21]

SVOJSTVA	MINERALNA ULJA	BILJNA ULJA	BIORAZGRADIVI SINTETIČKI ESTERI	POLIGLIKOL ULJA
Biorazgradivost ASTM D 5864, %	10 - 40	40 - 80	30 - 80	40 - 80
Viskoznost, cSt	15 - 150	32 - 68	20 - 300	10 - 100
Indeks viskoznosti	90 - 100	100 - 250	120 - 220	100 - 200
Tecište, $^{\circ}\text{C}$	- 54 do -15	- 20 do 10	- 60 do -20	- 40 do 20
Kompatibilnost s mineralnim uljima	-	dobra	dobra	ne miješa se
Oksidacijska stabilnost	dobra	srednja	srednja	loša
Vijek trajanja	2 godine	6 mjeseci do 1 godine	3 godine	2 godine
Relativna cijena	1	2 do 3	4 do 5	2 do 4

3.2.3. Biorazgradnja i ispitivanje biorazgradivosti fluida

Biorazgradnja je prirodni proces izazvan djelovanjem mikroorganizama. Uz prisutnost kisika, dušika, fosfora, te malim udjelom minerala organski su zagađivači u mogućnosti podržati rast mikroba, te ih pretvoriti u niz oksidacijskih produkata koji općenito završavaju s ugljičnim dioksidom i vodom.

Postoje dvije glavne podjele koje se često koriste pri definiranju biorazgradivosti. Prva podjela se temelji na konačnom stanju materijala nakon biorazgradnje, dok se druga temelji na brzini biorazgradnje.

Organizacije poput Organizacija za ekonomsku suradnju i razvoj (OECD), Koordinirano Europsko vijeće (CEC), te Američka agencija za zaštitu okoliša (EPA) razvili su standardne metode ispitivanja za određivanje toksičnosti i biorazgradivosti tvari. Ispitivanja biorazgradnje razvijena su kako bi utvrdili stupanj aerobne vodene biorazgradnje gotovih maziva ili samo nekih dijelova u kontroliranim laboratorijskim uvjetima.

3.2.3.1. Ispitivanje biorazgradnje pomoću ASTM metoda

ASTM D – 2, pododbor 12 o Ekološkim standardima maziva, razvio je nekoliko metoda ispitivanja biorazgradnje za određivanje biorazgradivosti ulja na bazi nafte, te ulja na bazi obnovljivih izvora. Neke metode ispitivanja vezane za hidraulički fluid biti će objašnjene u nastavku.

ASTM D 5864 metoda

Metoda ispitivanja biorazgradnje ASTM D 5864 je vrsta OECD 301 B, modificiranog Sturm ispitivanja („Modified Sturm Test”) koji oponaša uvjete biorazgradnje otpadnih voda. Ispitivanje se provodi u kontroliranim laboratorijskim uvjetima, te je dizajnirano kako bi mogli utvrditi stupanj aerobne vodene biorazgradnje maziva. Biorazgradivost je prikazana kao postotak maksimalne pretvorbe ugljika u laboratorijskim uvjetima u trajanju od 28 dana. Razina ugljičnog dioksida, u ovoj metodi će nam predložiti stupanj biorazgradnje maziva.

Uređaj za ispitivanje se sastoji od četiri zasebna dijela: sustav zraka sa slobodnim ugljičnim dioksidom, serije biorazgradivih reaktora, sakupljača ugljikovog dioksida, te titratora što je vidljivo na Slici 3. Ovi ispitni uređaji su jeftiniji od uređaja koji se primjenjuju pri ostalim metodama ispitivanja biorazgradivosti.

Ispitivanje se provodi u trajanju od 28 dana u mračnom okruženju. Titracija za nakupljanje ugljikovog dioksida provodi se svaki dan, prvih 10 dana, te nakon toga svaki dan sljedećih 18 dana ili dok razina ugljikovog dioksida ne postane dovoljno visoka. ASTM D 6046 navodi da je oznaka trajnosti brze biorazgradnje „Pw1”, te da mora biti veća ili jednaka 60% razvoja ugljikovog dioksida unutar 28 dana.

Zbog strogih uvjeta ispitivanja, nizak udio ugljikovog dioksida ne mora nužno značiti da ispitni uzorak nije biorazgradiv, već da je potrebno daljnje testiranje da se utvrdi biorazgradivost [22].



Slika 3. Prikaz uređaja za ASTM D 5864 metodu ispitivanja biorazgradivosti [23]

ASTM D 6731 metoda

Metoda ispitivanja biorazgradnje ASTM D 6731 je druga vrsta OECD 301 F ispitivanja, odnosno ispitivanje manometarskim respirometrom („Manometric Respirometry Test”) koje je poznato kao BOD ispitivanje („Biochemical Oxygen Demand”). Ispitivanje u zatvorenom respirometru konstruirano je tako da može utvrditi stupanj aerobne vodene biorazgradnje maziva ili njegovih dijelova koji su izloženi inokulumu⁵ u laboratorijskim uvjetima.

Biorazgradivost se ovim testom izražava kao postotak maksimalne potrošnje kisika u dobro kontroliranim uvjetima u vremenskom periodu od 28 dana. Potrošnja kisika mjeri se padom tlaka manometra, koji proizvodi signal što rezultira elektrolitičkom proizvodnjom kisika [25].

ASTM D 6046 navodi da brza biorazgradivost fluida u ovom ispitivanju mora biti veća ili barem 67% potrošnje kisika unutar 28 dana. Unatoč tome, u današnje vrijeme dostupni su mnogi ispitni uređaji kao „CES” respirometar koji ima mogućnost mjerenja razvoja ugljikovog dioksida tijekom respirometarskog ispitivanja. U tom slučaju, mikroorganizmi koriste kisik iz respirometra i proizvode ugljikov dioksid koji je zarobljen u apsorpcijskoj otopini, te se mjeri sa CO₂ senzorom.

Uređaji za ovu metodu su dobro konstruirani automatski sustavi (Slika 4) koji zahtijevaju manje zahtjeve osoblja. Zbog cijene uređaja i tehnike mjerenja, ova metoda ispitivanja nije primijenjena u industriji.



Slika 4. Prikaz uređaja za ASTM D 6731 metodu ispitivanja biorazgradivosti (respirometar) [23]

⁵ Inokulum je otopina različitih kultura bakterija, kojima se najepljuje supstrat (organska tvar) za pokretanje reakcija fermentacije [24].

ASTM D 6139 metoda

Metoda ispitivanja biorazgradnje ASTM D 6139 je vrsta EPA „Shake Flash” testa, te je slična metodi ispitivanja biorazgradnje prema ASTM D 5864. Ispitivanjem se utvrđuje stupanj aerobne vodene biorazgradnje nakon izlaganja inokulumu pod laboratorijskim uvjetima, a biorazgradivost maziva izražena je preko maksimalnog (teoretskog) postotka pretvaranja ugljika u kontroliranim uvjetima unutar 28 dana [26].

Uređaji za ispitivanje posebno konstruirati da potiču ispitivanje otopina, te se ugljikov dioksid prikuplja pomoću „Gledhill Shake Flask” sustava. U ovom ispitivanju, 60% i više ugljikovog dioksida smatra se brzo biorazgradivim.

Ova metoda nije precizna zbog različitih, odnosno raznih izvora inokuluma, te je zbog toga vrlo teško odrediti biorazgradivost maziva.

ASTM D 7373 metoda

Ispitivanje biorazgradnje pomoću ASTM D 7373 metode je biokinetički model koji se koristi za predviđanje biorazgradivosti maziva koristeći ASTM tehniku analiziranja i osnovni zakon mikrobiologije. Taj biokinetički model zahtijeva informacije za vrste baznog ulja korištene u mazivima, a ne zahtijeva ispitivanje biorazgradnje i inokuluma.

Prednosti ove metode su sposobnost određivanja biorazgradivosti maziva u jednom danu i izvrsna povezanost s rezultatima dobivenim metodama ispitivanja ASTM D 5864 i ASTM D 6731.

3.2.3.2. Ispitivanje biorazgradnje pomoću OECD metoda

Ispitivanje biorazgradnje OECD metodom također zahtijeva da postotak CO₂ mora dostići 60% u roku 10 dana nakon što je postigao 10%, ako je fluid klasificiran kao biološki razgradiv.

Različita ispitivanja uključuju mjerenja ugljika, potrošnju kisika u ispitivanju razgradnje i razvoj ugljikovog dioksida na kraju biološke razgradnje.

Najčešće korištene metode ispitivanja su OECD 301A, 301B i 301E koje će biti objašnjene u daljnjem tekstu.

OECD 301A – „AFNOR test”

Metoda se koristi za spojeve topive u vodi, koji su relativno ne hlapljivi i bez inhibicije bakterija otopo organski ugljik (DOC). Kriterij ispitivanja je utemeljen na gubitku DOC-a nakon 28 dana.

OECD 301B – „Modified Sturm test”

Metoda je primjenjiva za spojeve koji su topivi u vodi i one koji nisu topivi u vodi. Biorazgradnja se temelji na prinosu ugljikovog dioksida proizvedenog tijekom istraživanja u vremenu od 28 dana.

Ova metoda se često koristi da odredi biorazgradivost hidrauličkih fluida zbog ova tri razloga:

- Omogućuje određivanje biorazgradnje na najnižu moguću koncentraciju
- Korisna je za spojeve koji su topivi i ne topivi u vodi
- Metoda je jednostavna i jeftina za korištenje jer koristi titraciju

OECD 301E – „OECD Screening test”

Metoda se koristi za spojeve topive u vodi, ne hlapljive spojeve i ne inhibitorne spojeve. U ovoj metodi prate se promjene DOC-a s obzirom na vrijeme, te je slična s OECD 301A metodom.

Biorazgradnja može biti provedena s velikim brojem ispitivanja. Dva najviše suprotstavljena ispitivanja su CEC-L-33-A-94 ispitivanje i „Modified Sturm Shake Flask Test”.

CEC-L-33-A-94 ispitivanje se koristi za određivanje primarne biorazgradnje koja se odnosi na prvi stadij razgradnje, te odgovara početnim promjenama u molekularnom sastavu maziva. U Tablici 6 objašnjena je struktura CEC ispitivanja.

Tablica 6. Objašnjenje oznake CEC ispitivanja

CEC	Koordinirano Europsko vijeće
L	Ispitivanje maziva (<i>Lubricant</i>)
33	Ovi brojevi odnose se na redoslijed postupka
T ili A	T ukazuje na privremen postupak, dok A ukazuje na priznat postupak
94	Ovaj broj ukazuje na godinu postupka

„Modified Sturm Test” koristi se za procjenu konačne biorazgradnje. Pretpostavlja se da su elementi maziva potpuno mineralizirani.

U Tablici 7 prikazani su kriteriji za ispitivanja biorazgradivosti.

Tablica 7. Kriteriji za ispitivanja biorazgradivosti [21]

METODA	VRIJEME (u danima)	FAKTOR MJERENJA	KRITERIJ
ASTM D 5864	28	proizvodnja ugljikovog dioksida	>60%
ASTM D 6731	28	zahtjevi kisika	>60%
ASTM D 6139	28	proizvodnja ugljikovog dioksida	>60%
ASTM D 7373	1	izračun temeljen na analizi sastava	>60%
OECD 301A	28	gubitak otopljenog organskog ugljika	>70%
OECD 301B	28	proizvodnja ugljikovog dioksida	>60%
OECD 301C	28	zahtjevi kisika	>60%
OECD 301D	28	zahtjevi kisika	>60%
OECD 301E	28	gubitak otopljenog organskog ugljika	>70%
CEC-L-33-T-94	21	gubitak ugljikovodika	>80%

3.3. Teško zapaljivi fluidi

Teško zapaljivi hidraulički fluidi koriste se u proizvodnji električne energije, rudarstvu, lijevanju, te u vojsci. Primjenjuju se u situacijama gdje postoji potencijalna opasnost od zapaljenja. U takvim situacijama, istjecanje fluida može izazvati požar, dovesti do velike materijalne štete, ozljeđivanja osoba pa čak i smrti.

Teško zapaljivi hidraulički fluidi sastoje se od materijala koji imaju nižu energiju izgaranja nego mineralna ulja kao što je poliol ester, fosfat ester i vodena otopina glikola. Razlika teško zapaljivih hidrauličkih fluida od mineralnih ulja je u gustoći, kompatibilnosti i svojstvima podmazivanja.

3.3.1. Vrste teško zapaljivih fluida

ISO je uspostavio klasifikaciju, ISO 12922, za teško zapaljive fluide na temelju njihovih sastava što je prikazano u Tablici 8. Također je objavio vodič za korištenje teško zapaljivih hidrauličkih fluida u kojem prikazuje njihove karakteristike i pruža prijedloge za njihovo skladištenje, korištenje i rukovanje.

Tablica 8. Oznake ekološki prihvatljivih fluida prema ISO 12922 [14]

SIMBOL	KLASIFIKACIJA	KOMERCIJALNE OZNAKE
HFAE	Emulzija ulja u vodi koja sadrži više od 80% vode	Topljiva ulja
HFAS	Kemijske otopine u vodi koje sadrže više od 80% vode	Fluidi na bazi vode
HFB	Emulzija vode u ulju koja sadrži približno 45% vode	Obrnuta emulzija
HFC	Otopina glikola koja sadrži približno 45% vode	„Water-glycols”
HFDR	Sintetički fluidi bez prisustva vode koji sadrže fosfatni ester	Fosfatni esteri
HFDU	Sintetički fluidi bez prisustva vode i drugih sastava od HFDR	Poliol esteri

HFA

HFA fluidi sadrže više od 80% vode. ISO 6743 – 4 klasifikacija dijeli HFA fluide u dvije zasebne kategorije, HFAE i HFAS. HFAE fluidi su emulzija ulja u vodi („oil-in-water”). HFAS fluidi su kemijske otopine ili mješavina odabranih dodataka u vodi. Prije korištenja, oni su podijeljeni kao koncentrirani i razrijeđeni.

Maksimalna temperatura za HFA fluide je 50°C jer zbog visokog tlaka vodene pare na višim temperaturama može doći do pojave kavitacija. Neki od HFA fluida imaju kinematičku viskoznost usporedivu s vodom, približno 1 centistok na 20°C. Mjere opreza su zahtijevane pri odabiru konstrukcijskog materijala filtera i pumpe. Preporuka je da se pri upotrebi HFA fluida bude u kontaktu s dobavljačima fluida i hidrauličkih komponenti.

HFB

HFB fluidi su emulzije vode u ulju („water-in-oil”) koja se sastoje od nafte, emulgatora, određenih dodataka i vode, te se često nazivaju obrnuta emulzija.

U obrnutoj emulziji, ulje predstavlja kontinuiranu fazu, a voda raspršenu fazu. Ulje sadrži inhibitore korozije i dodatke protiv trošenja, dok voda pruža svojstvo nezapaljivosti. Postotak vodenog udjela u HFB fluidima je između 43% - 45%. Smanjenjem tog postotka, prilikom isparavanja, pogoršavaju se svojstva nezapaljivosti, te je važno održavanje udjela vode radi sigurnosti. Pri odabiru HFB fluida također su potrebne mjere opreza kao kod HFA fluida.

HFC

HFC fluidi su otopine vode, glikola, sredstva za zgušnjavanje i određenih dodataka. Poznati su pod nazivom vodeni glikol („water-glycol”) koji se sastoji od dietil glikola ili propilen glikola i polialkil glikola. Niska molekularna masa glikola smanjuje tlak pare fluida, dok se visoko molekularni polialkilni glikol ponaša kao sredstvo za zgušnjavanje, najčešće kao poboljšivač indeksa viskoznosti. Zajednička upotreba zgušnjivača i glikola, poboljšava svojstva podmazivanja više od samog glikola i smanjuje vjerojatnost kavitacijske erozije. Maksimalna temperatura djelovanja vodenog glikola je 50°C zbog efekta temperature na tlak pare.

Materijali koji bi se trebali izbjegavati pri odabiru komponenti hidrauličkog sustava su aluminij, cink, kadmij i magnezij.

HFD

HFD su teško zapaljivi fluidi koji ne sadrže vodu. Prema ISO 6743 – 4 opisane su dvije vrste HFD fluida, HFDR i HFDU. HFDR fluidi se sastoje od fosfatnog estera, dok se HFDU fluidi sastoje od poliol estera ili polialkilog glikola.

U industrijskim hidrauličkim sustavima obično se koriste HFDU fluidi na bazi poliol estera, dok se polialkilog glikoli i fosfatni esteri koriste manje. Primarni razlog je cijena i prednost poliol estera u odnosu na polialkilog glikole i fosfatne estere.

HFD fluidi imaju izvrsna svojstva podmazivanja, ali su skloni hidrolizi u prisutnosti vode. Gušći su od mineralnih ulja i imaju različiti kemijski sastav.

3.3.2. Opasnost i izvori zapaljenja hidrauličkih fluida

Plamen predstavlja glavnu opasnost u mnogim industrijama, transportu, te u vojnoj primjeni. U današnje vrijeme potrebno je provoditi sve više metoda ispitivanja i pratiti industrijske standarde koji mogu otkriti razinu opasnosti od požara.

Ispitivanja moraju biti provedena tako da stimuliraju opasnost od požara u hidrauličkom sustavu. Moraju predvidjeti rizik od požara, vrstu izvora zapaljenja, iznos dostupne energije u odnosu na iznos vode i fizičko stanje fluida. Izbor testova za ispitivanje nezapaljivosti odabran je od strane industrijskog društva, osiguravajućeg društva i organizacija za standarde. Ispitivanje bi trebalo pružiti informacije u pogledu otpornosti na zapaljenje fluida, a ako dođe do zapaljenja treba uzeti u obzir širenje vatre.

Opasnost od vatre u hidrauličkom sustavu uključuje brzo oslobađanje topline, izgaranje toksičnih i korozivnih spojeva, te dima koji mogu uzrokovati ozljede i smrt.

Zapaljenje hidrauličkih fluida pojavljuje se kada postoji pukotina ili lom hidrauličkog sustava, što uzrokuje visoki tlak koji rezultira raspršivanjem i istjecanjem hidrauličkog fluida. Prilikom toga, u obzir se mora uzeti potencijal zapaljenja različitih izvora kao što su električna iskra, plamen ili vruća površina.

Tijekom zapaljenja pojavljuje se proces destilacije koji razdvaja hidrauličke fluide na nekoliko komponenti, te se te komponente mogu lako zapaliti u prisustvu plamena ili iskre.

Porozni materijali kao cijevne izolacije, kartonske kutije, tekstil i čak ugljen iz rudnika mogu upiti hidraulički fluid koji polako oksidira i stvara perokside, koji imaju potencijal da se naknadno spontano zapale.

Faktore koje treba uzeti u obzir kod odabira hidrauličkog fluida su:

- Blizina hidrauličke opreme i opasnosti od požara
- Dostupnost nezapaljivih fluida
- Svojstva fluida
- Potrebna oprema za konstrukcijske promjene

Potencijalni izvori zapaljenja uključuju:

- Brzu kompresiju i udarni val zapaljenja
- Oblike ugljičnog kisika
- Prisutnost peroksida
- Spontana zapaljenja
- Elektrostatička pražnjenja

Primjena hidrauličkih fluida može biti prisutna u blizini različitih izvora zapaljenja, te je vrlo važno odabrati pravi model ispitivanja zapaljivosti fluida na temelju toga gdje će se fluid koristiti.

3.3.3. Ispitivanje zapaljivosti fluida

3.3.3.1. Karakteristike zapaljivosti fluida

Temperatura paljenja i temperatura gorenja („Open-cup flash point and fire point”)

Temperatura paljenja je najniža temperatura pri kojoj je iznad površine fluida dovoljno pare da dođe do zapaljenja na njegovoj površini. Točka gorenja je temperatura pri kojoj fluid gori najmanje 5 sekundi.

Povišenjem temperature paljenja i temperature gorenja se povećava nezapaljivost fluida što je posebno važno u situacijama gdje fluid isparava na visokim temperaturama. Ovo ispitivanje je

neprikladno za nezapaljive fluide na bazi vode jer je teško procijeniti vrijeme zagrijavanja. Ovaj postupak je opisan u ASTM D 92-05 („Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup”)

Indeks kisika

Indeks kisika je definiran u ISO 4589 kao minimalna koncentracija kisika u mješavini kisika i dušika na temperaturi $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ koja podržava izgaranje materijala pod određenim uvjetima ispitivanja u trajanju od 60 i više sekundi [27].

Ispitivanje je jeftino i jednostavno za izvođenje, ali se još uvijek više koristi ispitivanje temperature gorenja i temperature paljenja. Uređaj za mjerenje indeksa kisika prikazan je na Slici 5.



Slika 5. Uređaj za mjerenje indeksa kisika [28]

Brza kompresija („Rapid compression”)

Zapaljenje ili eksplozija se mogu pojaviti kada se zrak u kontaktu s hidrauličkim fluidom brzo zagrije zbog kompresije.

Ispitivanje se provodi uvođenjem zraka, pri tlakovima usporedivim s onima u hidrauličkim sustavima, kroz ventil u cijev malog promjera čija je unutarnja površina u fluidu koji se ispituje. Koriste se cijevi duljine 3 – 9 metara, ali sagorijevanje je teže postići u duljim cijevima jer je smanjena brzina povećanja tlaka zbog većeg volumena cijevi i dolazi do gubitka energije konvekcijom i kondukcijom. Smanjenje potencijala sagorijevanja može se pripisati relativno niskoj temperaturi zraka gdje gubitak male količine energije predstavlja veliko smanjenje temperature.

Temperatura samozapaljenja

Temperatura samozapaljenja ili „Auto-ignition temperature (AIT)” je najniža temperatura potrebna da se započne ili uzrokuje samoodrživo izgaranje fluida bez prisustva iskre ili plamena. AIT mjeri spontano zapaljenje fluida u zraku tlaka 1 atm.

AIT je određen u skladu s ASTM D 2155 („Standard Test Method for Auto-ignition Temperature of Liquid Petroleum Products”). U Tablici 9 prikazane su temperature samozapaljenja, temperature paljenja i temperature gorenja za nekoliko hidrauličkih fluida.

Tablica 9. Prikaz određenih temperatura pojedinih fluida [29]

FLUID	TEMPERATURA SAMOZAPALJENJA (°C)	TEMPERATURA PALJENJA (°C)	TEMPERATURA GORENJA (°C)
ISO VG 10 mineralna ulja	320	166	180
ISO VG 46 triaril fosfat	580	246	365
ISO VG 46 poliol ester	450	275	325
ISO VG 46 poliglikol	400	274	321

3.3.3.2. Postupci određivanja količine topline.

Toplina izgaranja

Toplinom izgaranja ne mjeri se zapaljivost fluida, nego toplina izazvana tijekom izgaranja. Ovo svojstvo se smatra kao značajan faktor u određivanju karakteristika zapaljivosti. Smanjenjem topline izgaranja povećava se nezapaljivost.

Vrijeme zagrijavanja

Nezapaljivost fluida odražava se vremenom koje je potrebno da se fluid zagrije do 90°C od sobne temperature i uspoređuje se s vremenom zagrijavanja mineralnih ulja i destilirane vode.

Ispitivanje se provodi zagrijavanjem određenog volumena fluida u izoliranoj posudi od nehrđajućeg čelika u koju se uroni grijač i termometar. Razlike u vremenu zagrijavanja ukazuje nam na toplinski kapacitet fluida

Konus kalorimetar („Cone calorimeter”)

Pomoću ovog ispitivanja mjeri se količina oslobođene topline sagorijevanjem plastike, tekstila i građevinskog materijala. Temelji se na načelu potrošnje kisika koja je izravno povezana s količinom oslobođene topline. Na Slici 6 prikazan je uređaj za ispitivanje, tzv. „Cone calorimeter”.



Slika 6. „Cone calorimeter” [30]

3.3.3.3. Metode ispitivanja zapaljivosti fluida

Ispitivanje isparavanja

Ispitivanja se provode da otkriju zapaljive karakteristike fluida koji u sebi sadrže porozne ili materijale slične fitilju („wick-like materials”) kao što su parne cijevi i izolacijske pijene. Opasnost od zapaljenja proizlazi iz situacije kada fluid uđe u porozne materijale i oksidira. Izolacijske osobine poroznog materijala smanjuju mogućnost gubitka topline i fluid se može spontano zapaliti.

Testovi za ispitivanje isparavanja su:

- Keramički test („Ceramic wick test”)
 - Provođi se potapanjem jednog kraja keramičke trake u hidraulički fluid koja se nakon nekog vremena zapali, te je to ujedno i pokazatelj lake zapaljivosti hidrauličkog fluida nakon zasićenosti porozne podloge.
- Test pomoću sredstva za čišćenje cijevi („Pipe cleaner wick test”)
 - Sredstvo za čišćenje namočeno je u hidraulički fluid i stavlja se u peć na temperaturu od 65°C, te se zatim njime prolazi kroz plamen vatre.
- Test zapaljivosti pomoću natopljene kocke („Soaked-cube flammability test”)
 - Fluid stavljen u kocku od izolacijskog materijala, stavlja se u peć i temperatura se povećava dok se ne stvori egzotermna reakcija.

Ispitivanje zapaljivosti fluida na vrućim površinama

Svrha ispitivanja je zapaljivost fluida kada je u kontaktu s vrućom površinom kako bi se utvrdilo dali će se hidraulički fluid zapaliti i izgorjeti prilikom njegovog raspršivanja po vrućoj površini.

Testovi ove metode ispitivanju su:

- Ispitivanje pomoću rastaljenog metala („Monsanto test”)
 - Monsanto je razvio test za procjenu gorenja i širenja plamena koji se može pojaviti kada je hidraulički fluid raspršen na rastaljeni metal, cink ili aluminij. Test se može provesti sa ili bez vanjsko izvora zapaljenja. Europska verzija ovog testa izvodi se prelijevanjem hidrauličkog fluida u rastopljeni metal.
- „Houghton test”
 - Ispitivanje se provodi dovođenjem fluida na vruću površinu i praćenjem vremena prije zapaljenja, te temperatura na kojoj se to zapaljenje pojavljuje.
- Ispitivanje pomoću vruće cijevi
 - Jedan od glavnih problema u hidrauličkim sustavima je mogućnost požara pri puknuću cijevi u blizini izvora topline, te se ovaj test koristi za simulaciju upravo ovakvih situacija. Ispitivanje se provodi dovođenjem fluida, na vruću cijev, kap po kap ili u mlazu kao što je to moguće u stvarnim situacijama.

Ispitivanje zapaljivosti raspršivanjem

Vjerojatno najčešće korišten test u ispitivanju potencijalnog rizika požara prilikom loma u hidrauličkom sistemu. Oblici ovog ispitivanja uključeni su u nacionalne standarde mnogih država kao i u industrijske standarde, uključujući ISO 12922.

Prilikom ispitivanja četiriju vrsta nezapaljivih hidrauličkih fluida samo fluidi sa visokim postotkom vode i „water-glycol” fluidi su pokazali dobre karakteristike nezapaljivosti pri otvorenom plamenu i pri površinama visokih temperatura.

Svojstva nezapaljivih hidrauličkih fluida ne mogu biti definirana samo jednim ispitivanjem jer često postoji više potencijalnih izvora zapaljivosti fluida u određenoj industrijskoj primjeni.

4. IZBOR HIDRAULIČKOG FLUIDA

Hidraulički sustavi rade na zadovoljavajući način koristeći razne fluide. Sve češći zahtjevi industrije za većom učinkovitošću i povećanju brzine rada pri povišenim temperaturama i tlakovima mijenjaju zahtjeve prema hidrauličkim sustavima [31].

U današnje vrijeme postoji veliki izbor fluida, ali to što hidraulički sustav radi s nekim od tih fluida ne znači da je to optimalno rješenje za tu primjenu. Loš odabir fluida ne dovodi do katastrofalnog neuspjeha nego skraćuje prosječni životni vijek podmazanih dijelova što može proći nezapaženo. Odabir odgovarajućeg hidrauličkog fluida zahtijeva osnovno znanje o pojedinom fluidu u odnosu na idealan fluid. Karakteristike idealnog fluida su:

- Toplinska stabilnost
- Hidrolitička stabilnost
- Slaba korozivnost
- Visoka otpornost prema trošenju
- Niska sklonost kavitaciji
- Duži vijek trajanja
- Konstantna viskoznost bez obzira na temperaturu
- Niska cijena

Ne postoji fluid koji ima sve karakteristike idealnog fluida, ali moguće je odabrati onaj fluid koji najbolje odgovara određenom hidrauličkom sustavu. Prilikom odabira fluida potrebno je poznavati karakteristike sustava u kojem će se fluid koristiti, kao što su:

- Najveća i najmanja radna temperatura i temperatura okoline
- Vrsta pumpe
- Radni tlakovi
- Radni ciklusi
- Vrsta kontrole i snaga ventila

Ne postoji niti jedna definitivna preporuka koja pokriva sve vrste hidrauličke opreme u primjeni stoga je potrebno uzeti u obzir nekoliko čimbenika pri odabiru odgovarajućeg hidrauličkog fluida. Hidraulički fluidi se određuju prema vrsti hidrauličke pumpe koje se koristi u određenom hidrauličkom sustavu, radnoj temperaturi i tlaku sustava.

4.1. Faktori koje uzimamo u obzir pri odabiru fluida

Viskoznost

Viskoznost fluida određuje minimalna i maksimalna temperatura rada pri opterećenju sustava. Pri odabiru fluida najveću prednost ima onaj fluid koji pokazuje najbolju minimalnu viskoznost na najvišoj temperaturi rada.

Trošenje i faktori koji sprječavaju trošenje

Pojam trošenja podrazumijeva situaciju do koje dolazi prilikom kontakta metala („metal-to-metal”). Prilikom odabira fluida potrebno je odabrati fluid koji stvara tanki zaštitni sloj ulja ili dodataka između pokretnih metalnih dijelova. Najčešće korišteni dodatak u hidrauličkom fluidu koji smanjuje trošenje je cink ditiofosfat (ZDP).

U bilo kojem hidrauličkom sustavu pumpa predstavlja sklonost trošenju, a svaka vrsta pumpe (klipna, krilna, zupčasta) ima različite zahtjeve za zaštitu od trošenja. U sustavu u kojem se koriste dvije ili više vrsta pumpi odabire se hidraulički fluid koji ima prihvatljiva svojstva za zaštitu svih komponenti.

Pjenjenje

Pjena koju fluid prenosi smanjuje karakteristike sustava gdje u najgorem slučaju može doći do pojave kavitacije, odnosno uništenja komponenti.

Dvije vrste pjene koje se pojavljuju u hidrauličkom sustavu su površinska pjena, koja se stvara na površini fluida u spremniku, te pjena koja cirkulira sustavom. Pravilnim odabirom dodataka i baznih ulja sprečava se stvaranje pjene u sustavu.

R&O (inhibitori korozije i oksidacije)

U odabiru fluida izabire se onaj fluid koji pokazuje najbolju zaštitu protiv korozije i sadrži antioksidanse, te pokazuje dobru stabilnost u prisutnosti vode.

Toplinska stabilnost

Pri vrlo visokim temperaturama fluid stvara razgradne produkte. Pri odabiru fluida treba težiti da fluid pokazuje dobru toplinsku stabilnost. Iako to često nije lako odabrati, stalna umjerena temperatura i stabilno stanje su najbolji za vijek trajanja fluida.

Pri odabiru fluida za hidraulički sustav, fluid se odabire prema određenim svojstvima pojedinog fluida kao što su otpornost na koroziju i oksidaciju, toplinska stabilnost, te otpornost na trošenje. Ostala svojstva mogu se uzeti u obzir, ali nisu toliko važna za njegovu učinkovitost.

Hidraulički fluid mora biti kompatibilan s ostalim elementima sustava, kao što su brtve za koje je važno da u dodiru s fluidom ne promijene svoju veličinu, odnosno kako fluid ne bi ometao njen pravilan rad.

Dvije vrlo važne stavke koje ne utječu direktno na rad fluida u hidrauličkom sustavu, ali imaju veliki utjecaj na ukupnu cijenu fluida su vijek trajanja fluida i njegova raspoloživost. Fluidi koji imaju dug vijek trajanja, pridonose dodatnoj uštedi kroz niže troškove održavanja i zamjene fluida koji u velikim hidrauličkim sustavima mogu biti veliki. Odabir pravilnog fluida doprinositi će dužem vijeku trajanja komponenti sustava i smanjenju problema zagađenja okoliša. Visokim zahtjevima da se okoliš održi čistim i čestim promjenama o tome što je toksično, raste problem raspoloživosti fluida. Fluidi i lokalni zakoni o zaštiti okoliša trebali bi utvrditi potencijalne probleme.

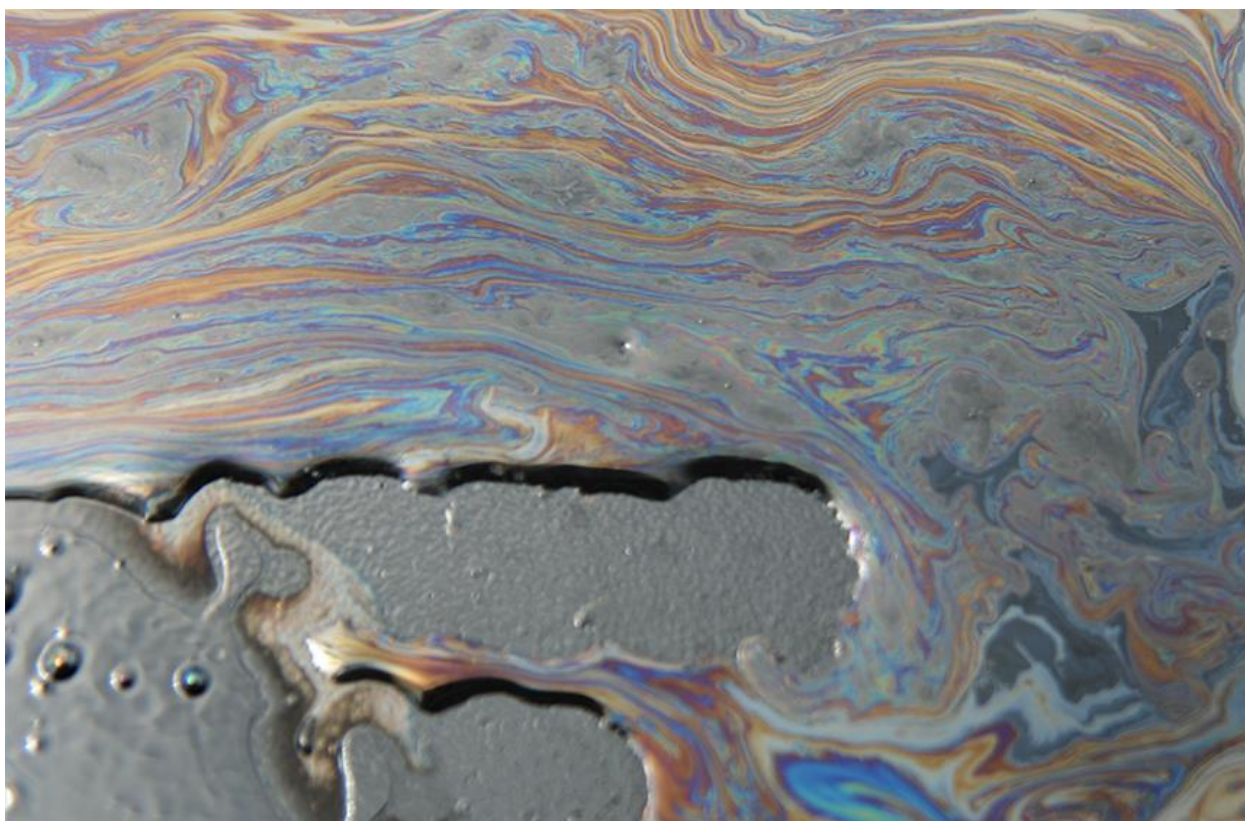
Dobar primjer hidrauličkog fluida je sintetički fluid koji ne sadrži vosak koji se zgušnjava pri niskim temperaturama, te ne sadrži spojeve koji lako oksidiraju na visokim temperaturama koji su primjerice prisutni u prirodnim mineralnim uljima. Radi toga sintetički fluidi se koriste u primjeni s vrlo niskim i vrlo visokim temperaturama kao i u vrlo širokom rasponu temperatura [32].

4.2. Osnovni problemi postavljeni prilikom odabira fluida

Na temelju gore navedenih karakteristika daje se zaključiti da pri odabiru fluida postoji mnogo razloga zašto primijeniti, odnosno zašto ne primijeniti određeni fluid. Također, za pravilan odabir fluida potrebno je znati u kakvim uvjetima će fluid biti primijenjen, u kakvom sustavu će raditi,

okruženju, pri kojoj temperaturi, tlaku. Sve su to pitanja koja će biti postavljena pred odgovornu osobu u trenutku odluke s kojim će se hidrauličkim fluidom raditi.

U protivnom, može doći do velikih problema vezanih za onečišćenje okoliša, nepravilan rad, te ozljeda zadobivenih pri radu s tim fluidima, odnosno do nepotrebne havarije. Prikaz onečišćenja uzrokovan istjecanjem fluida u okoliš prikazan je na Slici 7.



Slika 7. Prikaz onečišćenja okoliša [33]

5. ODRŽAVANJE HIDRAULIČKOG FLUIDA

Nakon pravilnog odabira fluida, održavanje fluida ima vrlo veliki značaj u radu i vijeku trajanja hidrauličkog sustava. Iskustva govore da je više od 75% svih kvarova u hidrauličkim sustavima uzrokovano kontaminacijom, odnosno onečišćenjem fluida. Troškovi uzrokovani kontaminacijom su poprilično veliki i uzrokuju [34]:

- Gubitak proizvodnje
- Troškove zamjene komponenti
- Skupo zbrinjavanje
- Povećani ukupni troškovi održavanja
- Česte troškove fluida

5.1. Vrste onečišćenja fluida

Onečišćenje hidrauličkog fluida definira se kao bilo koja supstanca koja utječe na pravilan rad hidrauličkog sustava, a najčešće vrste onečišćenja hidrauličkog fluida su:

- Onečišćenje krutim česticama
- Onečišćenje vodom
- Onečišćenja zrakom

5.1.1. Onečišćenje krutim česticama

Onečišćenje hidrauličkog fluida krutim česticama je rezultat unošenja čestica iz okoline ili rezultat trošenja površina komponenti. Čestice se prema veličini dijele na one manje od $5\mu\text{m}$ i na one veće ili jednake $5\mu\text{m}$ koje uzrokuju trenutnu katastrofu.

Mehanizam djelovanja čestica na proces trošenja, te na rad i vijek korištenja hidrauličkih komponenti je različit i složen. Čestice zajedno s hidrauličkim fluidom protječu kroz sustav, te se pri tome dio čestica dovodi u kontakt s površinom gdje dolazi do procesa trošenja. Osim procesa trošenja, čestice mogu dovesti i do trenutnog zastoja hidrauličkog sustava, npr. začepljenjem.

Do onečišćenja fluida s krutim česticama dolazi zbog različitih razloga, kao što su:

- Čestice su slučajno ugrađene u hidraulički sustav tijekom proizvodnje i montaže
- Dodane su s novim fluidom
- Čestice su dobivene tijekom abrazijskog trošenja, kavitacije, loma, erozijskog trošenja, korozije...

5.1.2. Onečišćenje vodom

Voda u hidrauličkom fluidu prvenstveno djeluje negativno na fluid, uzrokuje ubrzanu koroziju, abraziju, smanjeno djelovanje dodataka, te brže stvaranje kiselina. Kao i čestice, obavezno se mora ukloniti iz hidrauličkog sustava.

U standardima koji opisuju fizičko – kemijske karakteristike hidrauličkih ulja navodi se da bi postotak vode u ulju trebao biti sveden na minimalnu razinu, jer mali postotak vode vidljivo mijenja izgled fluida, odnosno njegova svojstva. Na Slici 8 prikazan je vizualni efekt vode u ulju.



Slika 8. Vizualni efekt vode u ulju [34]

Voda u hidrauličke sustave dolazi na različite načine, kao što su:

- Kroz istrošene brtve aktuatora
- Kroz poklopac spremnika
- Kondenzacijom
- Propuštanjem izmjenjivača topline

Nakon što je otkriven povišen postotak vode u hidrauličkom sustavu, on se uklanja jednim od sljedećih postupaka:

- Apsorpcijom
 - Odvajanje vode iz hidrauličkog sustava postiže se pomoću filtera koji su namijenjeni da pokupe višak vode. Apsorpcija se koristi kada su u pitanju male količine vode.
- Centrifugiranjem
 - Ovaj postupak koristi za odvajanje veće količine vode pomoću centrifugalne sile.
- Vakuum dehidracijom
 - Odvajanje vode iz ulja postiže se pomoću vakuuma i procesa sušenja, odnosno uređaja za vakuum dehidraciju koji je prikazan na Slici 9. Postupak se također koristi za veće količine vode.



Slika 9. Uredaj za vakuum dehidraciju [35]

5.1.3. Onečišćenje zrakom

Zrak se u hidrauličkom sustavu može nalaziti u otopljenom ili neotopljenom stanju. Otopljeni zrak ne predstavlja problem ako ostaje u fluidu, dok zrak u neotopljenom stanju stvara probleme prolaskom kroz komponente sustava gdje dolazi do promjene tlaka prilikom kompresije, koji rezultira povećanjem topline u malim mjehurićima zraka. Kada količina otopljenog zraka postane dovoljno velika on će imati negativan utjecaj na karakteristike sustava.

Također, zrak je potencijalni izvor oksidacije u tekućinama. To svojstvo pogotovo dolazi do izražaja kada je uz zrak, prisutna i voda.

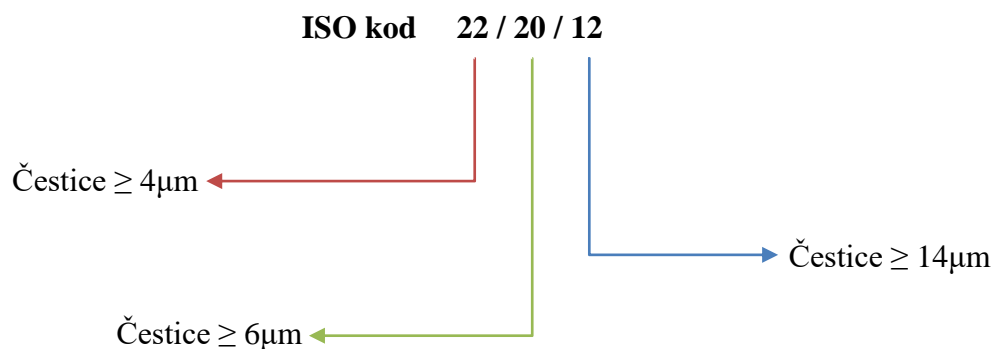
Najčešći razlozi za prisutnost zraka u hidrauličkim sustavima su:

- Propuštanje sustava
- Prozračivanje pumpe
- Turbulencije fluida u spremniku

Uklanjanje prekomjernog zraka moguće je pomoću potopljene usisne pumpe i pravilno projektiranog spremnika fluida.

5.2. Standard čistoće fluida

Razina čistoće fluida prema standardu ISO 4406:1999 definira se ukupnim brojem čestica većih od 4, 6 i 14 μ m u poznatom volumenu od 1ml ili od 100ml [36]. Broj čestica 4+ i 6+ μ m koriste se kao referentna točka za čestice „mulja”. Raspon veličina 14+ μ m označava količinu većih čestica koje uvelike doprinose mogućnosti katastrofalnog kvara komponenti sustava. Objašnjenje ISO koda prikazano je na sljedećem primjeru, a klasifikacija tog koda definirana je u Tablici 10.



Tablica 10. Prikaz ISO klasifikacija 22 / 20 / 12 [34]

RASPON BROJEVA	MIKRON	STVARNI BROJ RASPONA ČESTICA (po ml)
22	4	20 000 – 40 000
20	6	5 000 – 10 000
12	14	80 – 160

Kod definiranja broja čestica na uzorku fluida potrebno je imati na umu da se uvijek računa s ukupnim brojem čestica većih od naznačene veličine. To znači da su u broju čestica veličine [36]:

- 4μm, uključene sve čestice jednake i veće od 4μm, pa i čestice 6 i 14μm
- 6μm, uključene sve čestice jednake i veće od 6μm, pa i čestice veličine 14μm
- 14μm, uključene sve čestice jednake i veće od 4μm

U Tablici 11. prikazana je klasifikacije čistoće fluida prema ISO 4406:1999.

Tablica 11. Klasifikacija čistoće ulja prema ISO 4406:1999 [34]

RASPON BROJEVA	BROJ ČESTICA (po ml)	
	VIŠE OD	DO I UKLJUČIVO S TIM
24	80 000	160 000
23	40 000	80 000
22	20 000	40 000
21	10 000	20 000
20	5 000	10 000
19	2 500	5 000
18	1 300	2 500
17	640	1 300
16	320	640
15	160	320
14	80	160
13	40	80
12	20	40
11	10	20
10	5	10
9	2.5	5
8	1.3	2.5
7	0.64	1.3
6	0.32	0.64

5.3. Filtriranje hidrauličkog fluida

Izmjena ulja u hidrauličkim sustavima vrši se ne samo kada je nastupila kemijska degradacije, gdje je izmjena fluida opravdana, nego i u slučajevima kada je došlo do kontaminacije fluida krutim česticama ili vodom, te u tom slučaju ulje nakon filtriranja može biti vraćeno u hidraulički sustav.

Često ni kvaliteta novog fluida ne odgovara zahtjevima čistoće hidrauličkih sustava visokih performansi pa je i prije prve upotrebe potrebna filtracija.

Tijekom rada sustava pomoću filtera smanjenje se udio nečistoća u fluidu na dozvoljenu vrijednost, te se tako štite komponente hidrauličkog sustava od prekomjernog trošenja. **Finoća filtriranja** odgovara promjeru najveće čestice u obliku kugle koja može proći kroz filter, a u današnje vrijeme zahtijeva se čistoća od 20 μ m, pa sve do 3 μ m za servo – ventile.

5.3.1. Vrste materijala i efikasnost filtera

Vrsta materijala filtera odgovorna je za uklanjanje onečišćenja iz hidrauličkih sustava. Filteri su najčešće zvjezdasto nabrani čime se dobiva veća površina filtriranja i povećani vijek trajanja jer se onečišćenja skupljaju u naborima.

Materijali od kojih se izrađuju filteri su:

- Papir (celuloza)
 - Filteri od papira su jednokratni i omogućuje finoću filtriranja od 10 μ m.
- Žičana tkanina
 - Filteri su izrađeni od nehrđajućeg čelika. Početna cijena im je visoka, dok svojstva baš i nisu dobra.
- Stakloplastika
 - Filteri od stakloplastike sadrže vlakna koja su ujednačene veličine i oblika s kružnim poprečnim presjekom, te su ujedno i tanja od celuloznih vlakana.

U Tablici 12 prikazana je usporedba materijala od kojeg su izrađeni filteri.

Tablica 12. Usporedba karakteristika materijala filtera [34]

MATERIJAL FILTERA	UČINKOVITOST HVATANJA	KAPACITET DRŽANJA NEČISTOĆA	DIFERENCIJALNI TLAK	VIJEK TRAJANJA U SUSTAVU	POČETNI TROŠKOVI
Staklo – plastika	Visoka	Visok	Umjeren	Dugi	Umjereni i visoki
Papir (celuloza)	Umjerena	Umjeren	Visok	Umjeren	Niski
Žičana tkanina	Niska	Nizak	Nizak	Umjeren	Visoki

Industrija za filtriranje koristi ISO 4572 („Multipass Test Procedure”) za ispitivanje karakteristika filtera, te je ovaj postupak ispitivanja priznat i od strane ANSI organizacije. Tijekom ovog ispitivanja, fluid cirkulira kroz krug pod precizno kontroliranim uvjetima. Diferencijalni tlak, preko elementa koji se ispituje, prati se kontinuirano kao konstantna količina onečišćenja ubrizgana uzvodno od tog elementa, a laserski senzori čestica mjere razinu onečišćenja uzvodno i nizvodno od ispitivanog elementa.

Stupanj finoće filtriranja β_x predstavlja omjer broja čestica n_x , veličine x , prije i poslije filtriranja. Npr. broj čestica veličine 10 μ m izmjerenih uzvodno je 50 000, a nizvodno 10 000 što znači da je na ulazu u filter bilo 5 puta više čestica veličine 10 μ m.

Pomoću β_x možemo izračunati efikasnost zadržavanja čestica prema sljedećem izrazu [37]:

$$Efikasnost_x = \left(1 - \frac{1}{\beta_x}\right) \cdot 100\% \quad (5.1)$$

U Tablici 13 prikazane su neke vrijednosti stupnja finoće filtriranja i odgovarajuće efikasnosti.

Tablica 13. Prikaz vrijednosti stupnja finoće filtriranja i odgovarajuće efikasnosti [34]

OMJER BETE (u određenoj veličini čestica)	EFIKASNOST (u istoj veličini čestica)
1.01	1.0 %
1.1	9.0 %
1.5	33.3 %
2.0	50.0 %
5.0	80.0 %
10.0	90.0 %
20.0	95.0 %
75.0	98.7 %
100	99.0 %
200	99.5 %
1000	99.9 %

5.3.2. Vrste filtera i njihova primjena

Usisni filter ulja

Usisni filteri koriste se kako bi zaštitili pumpu od onečišćenja prilikom usisavanja fluida iz spremnika, te se zbog toga ugrađuju ispred ulaza u pumpu. Zbog kavitacijskog ograničenja pumpe ti filteri sadrže relativno grube elemente, te se zbog toga ne koriste kao primarni zaštita od onečišćenja. Finoća filtriranja im iznosi oko 100 μm .

Tlačni filter ulja

Tlačni filteri se u hidrauličkom sustavu nalaze nakon pumpe, tj. nizvodno, te tako pomažu pri zaštiti od onečišćenja koje je uzrokovano pumpom. Najčešće se ugrađuju neposredno ispred upravljačkih ili regulacijskih uređaja, kao što su servo – ventili zbog njihove zaštite [38]. Zbog izloženosti visokom tlaku, konstrukcija filtera mora biti robusna. Finoća filtriranja im uobičajeno iznosi 1 – 10 μm .

Povratni filter ulja

Povratni filter ulja ugrađuje se u povratni vod, te je to posljednja komponenta kroz koju prolazi fluid prije ulaska u spremnik. Najčešće korišteni filter ulja u hidrauličkim sustavima. Uobičajena finoća filtriranja iznosi oko 10 - 20 μm . Najčešće se koriste u paru kako bi se izbjeglo isključivanje sustava prilikom zamjene filtera.

Nalivni filter ulja

Nalivni filter ili filter za odzračivanje ugrađuje se u spremnik ulja i ima dvije funkcije. Prva funkcija tog filtera odnosi se na nalijeva ulje u spremnik i istovremenog filtriranja, a druga funkcija se odnosi se na odzračivanje spremnika koje osigurava atmosferski tlak u spremniku bez obzira na volumen ulja.

5.3.3. Ispitivanje kvalitete fluida

Ispitivanje kvalitete fluida vrlo je važno pri održavanju sustava jer nam osigurava da je fluid u skladu sa specifikacijama proizvođača, provjerava svojstva fluida i određuje ukupnu razinu onečišćenja [34].

Postoje tri metode ispitivanja kvalitete fluida:

- „Patch test”
- Prijenosni brojač čestica
- Laboratorijska analiza

„Patch test”

Ispitivanje kvalitete fluida ovom metodom je zapravo vizualna analiza uzorka tekućine. Izvodi se uzimanjem uzorka fluida i analiziranjem boje i sadržaja pomoću mikroskopa, te uspoređivanjem s ISO standardima. Pogreške ove metode su dosta veliki zbog ljudskog faktora.

Prijenosni brojač čestica

Vrlo perspektivan razvoj u ispitivanju kvalitete fluida je prienosni brojač čestica koji je prikazan na Slici 10. Kako mu i samo ime govori, prenosiv je, te mu je to uz točnost i ponovljivost glavna prednost. Ispitivanje ovom metodom traje manje od minuta nakon čega uređaj daje broj čestice i klasifikaciju čistoće.

Laboratorijska analiza

Laboratorijskom analizom dobije se kompletan pogled na uzorak fluida, kao što je:

- Viskoznost
- Sadržaj vode
- Broj čestica
- Spektrometrijska analiza
- Potrebni grafovi

- Slike onečišćenja
- Preporuke

Prilikom uzimanja uzorka fluida iz sustava, mora se voditi računa o tome da uzorak tekućine prikazuje sustav. Kako bi se to postiglo, spremnici fluida moraju biti očišćeni prije uzimanja uzorka i fluid mora biti pravilno izvađen iz sustava. Standardi koji se koriste prilikom uzimanja uzorka iz sustava su NFPA T2.9.1-1972 i ASTM B93.13-1972



Slika 10. Prijenosni brojač čestica [39]

6. ZAKLJUČAK

Sagledavši sve dane činjenice i podatke iznesene u ovom radu, može se zaključiti da je izbor hidrauličkog fluida i njegovo održavanje vrlo bitno za pravilan rad hidrauličkog sustava, te za zaštitu okoliša.

Odgovornost pri odabiru hidrauličkog fluida je tim veća što fluid radi pri visokim temperaturama i tlaku ili je izvor topline neposredno blizu hidrauličkog sustava. U takvim situacijama, istjecanje fluida može izazvati požar, dovesti do velike materijalne štete, ozljeđivanja osoba pa čak i smrti.

Također, hidraulički sustavi sve češće koriste biorazgradive fluide kako ne bi prilikom nepažljivog istjecanja fluida ili kvara u sustavu došlo do kontaminacije biljnog i životinjskog svijeta. Posljedice koje uzrokuje upravo biorazgradivi fluid na okoliš su minimalne naspram mineralnih ulja koja se još uvijek vrlo često koriste.

Upravo iz tih razloga vidljivo je da izbor hidrauličkog fluida nije bezazlena činjenica, te da za pravilan rad treba pomno odabrati vrstu i tip hidrauličkog fluida. Kao što je navedeno i u radu, ne postoji točno određeno pravilo kako izabrati fluid, već to ovisi o svojstvima sustava i okoline. Pitanja koje se najčešće postavljaju prilikom odabira fluida su: pri kojem tlaku i temperaturi će raditi sustav, u kojem okruženju, kakve će biti komponente ugrađene u sustav. Uzevši u obzir sve te činjenice, daje se zaključiti da izbor hidrauličkog fluida nije jednoznačno određen već ovisi o mnogo parametara.

Održavanje hidrauličkog fluida je također vrlo važno kako bi se smanjili ukupni troškovi održavanja, te troškovi promjena komponenti koje su oštećene zbog neredovitog održavanja hidrauličkog sustava. Iako održavanje hidrauličkog sustava ne izgleda vrlo bitno, činjenice govore upravo suprotno. Čak 75% svih kvarova u sustavu uzrokovano je kontaminacijom.

Na kraju ovog rada daje se zaključiti da izbor pravilnog hidrauličkog fluida sve češće zahtijeva konzultacije sa stručnjacima, odnosno osobama koje imaju široko znanje o hidraulici i hidrauličkim sustavima.

7. LITERATURA

- [1] J.Petrić, „Hidraulika i pneumatika, 1. dio”, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012.
- [2] M.Fancev, „Mehanika fluida”, Tehnička enciklopedija, Sv.8., JLZ Miroslav Krleža, Zagreb
- [4] H.Gholizadeh, R. Burton, G. Schoenau, „Fluid Bulk Modulus : a Literature Survey”, Int. Journal of Fluid Power, Vol. 12, No. 3, pp. 5 – 16, 2011.
- [5] M.Šavar, Z.Virag, I.Džijan, „Mehanika fluida, skripta – predavanje”, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2014.
- [7] B.Halasz, „Uvod u termodinamiku”, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2012.
- [8] A.Galović, „Nauka o toplini II”, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1997.
- [9] B.Kraut, „Krautov strojarški priručnik”, Sajema, Zagreb, 2009.
- [10] ISO 6743 – 4, Lubricants, industrial oils and related products (class L) – Classification – Part 4 : Family H (Hydraulic systems).
- [11] ISO 11158 – Lubricants, industrial oils and related products (class L) – Family H (hydraulic systems) – Specifications for categories HH, HL, HM, HV and HG.
- [12] ISO 15380 – Lubricants, industrial oils and related products (class L) – Family H (Hydraulic systems) – Specifications for categories HETG, HEPG, HEES and HEPR.
- [13] ISO 12922 – Lubricants, industrial oils and related products (class L) – Family H (Hydraulic systems) – Specifications for hydraulic fluids in categories HFAE, HFAS, HFB, HFC, HFDR and HFDU.
- [14] Paul W.Michael, Thomas S.Wanke, „Hydraulic Fluid and System Standards”, Taylor & Francis group, LLC, 2012.
- [17] Eichenberger, H.F., „Biodegradable Hydraulic Lubricant”, SAE Technical Paper Series, 1991.
- [21] In – Sik Rhee, „Biodegradable Hydraulic Fluids”, Taylor & Francis group, LLC, 2012.
- [23] In – Sik Rhee, „Bio – based Hydraulic Fluids”, U.S. Army Tank Automotive Research, Development and Engineering Center, 2008.

[29] John V. Sherman, „Fire – Resistance Tasting Procedures and Standards of Hydraulic Fluids”, Taylor & Francis group, LLC, 2012.

[34] Parker Filtration, „The Handbook of Hydraulic filtration”

[38] R. Korbar, „Pneumatika i hidraulika”, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2007.

Web – Izvori

[3] http://www.pfst.unist.hr/uploads/Fizikalna_svojstva_fluida.pdf

[6] http://www.fizika.unios.hr/pof1/wp-content/uploads/sites/43/2011/02/Viskoznost_2014.pdf

[15] Statoil Lubricants Education Centre, „Hydraulic Fluids”, Catalog, www.statoil.dk

[16] <http://struna.ihjj.hr/naziv/gibanje-lt-i-gt-stick-slip-lt-i-gt/11455/>

[18] <http://www.bewusstkaufen.at/guetezeichen/203/blauer-engel.html>

[19] <http://www.nrdc.org/business/standards/greenseal.asp>

[20] <https://en.wikipedia.org/wiki/Ester>

[22] <http://www.astm.org/Standards/D5864.htm>

[24] https://bib.irb.hr/datoteka/429441.Pojmovnik_bioplina_-_Prirucnik.pdf

[25] <http://www.astm.org/Standards/D6731.htm>

[26] <http://www.astm.org/Standards/D6139.htm>

[27] <http://struna.ihjj.hr/naziv/granicni-indeks-kisika/6638/>

[28] <http://www.ts-rc.eu/>

[30] <http://www.concept-e.co.uk/products/cone-calorimeter/>

[31] <http://www.machinerylubrication.com/Read/25967/hydraulic-oil-lubrication-viscosity>

[32] <http://hydraulicspneumatics.com/200/TechZone/HydraulicFluids/Article/False/6449/TechZone-HydraulicFluids>

[33] <http://www.lokal.hr/clanak/izlilo-se-loz-ulje-iz-karlovacke-vojarne>

[35] <http://ph.parker.com/us/en/portable-purification-systems-pvs-series>

- [36] <http://www.filtriranjeulja.com/index.php?p=tabele#sistemi>
- [37] https://hr.wikipedia.org/wiki/Filtar_ulja
- [39] <http://www.tsi.com/aerotrak-handheld-particle-counter-9303/>